

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Направление подготовки/профиль 12.06.01 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии/профиль 05.11.13 приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности.

Отделение электронной инженерии.

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
<b>Ультразвуковая система контроля паянных соединений элементов Пельтье к радиаторным батареям</b>

Индекс УДК: 620.179.16:621.791.3.015:6697.353

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A4-33	Шульгин Евгений Михайлович		

Руководителя профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Юрченко Алексей Васильевич	Д.т.н.		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Баранов Павел Федорович	К.т.н.		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОЭИ	Солдатов Алексей Иванович	Д.т.н.		

## **Актуальность**

Существует необходимость проверки соединения радиаторов, электромагнитных датчиков и датчиков положения ротора. В связи с этим необходима технология проверки которая позволит вывести контроль качество на новый уровень.

В настоящее время контроль паянных соединений изделий сложной геометрии проводится за частую с использованием методов разрушающего контроля, что является не всегда удобным и приводит к достаточным временным, производственным и финансовым затратам.

Актуальность контроля паянных соединений изделий сложной геометрии обусловлена необходимостью сокращения издержек на производство продукции ОПК.

**Цель исследования** – разработка аппаратно-программного модуля с использованием FPGA, а так же разработка и апробация нового метода обработки данных с многоэлементной решетки датчиков, который должен обеспечить снижение вычислительных затрат.

Цели, поставленные в настоящей работе должны быть достигнуты за счет решения следующих задач:

- провести литературный и патентный поиск методов неразрушающего контроля с применением антенной решетки, изучить зарубежный опыт, описать наиболее распространенные методы неразрушающего контроля.
- разработать алгоритм нового метода обработки данных, сравнить метод обработки данных с существующими, сделать выводы о достоинствах и недостатках метода.
- разработать структурную и принципиальную схемы для реализации разработанного алгоритма на кристалле FPGA (ПЛИС), организовать передачу данных с использованием метода обработки данных
- разработать экспериментальный образец ультразвукового томографа, исследовать его характеристики.

## **Положения, выносимые на защиту:**

- применение сокращённой матрицы расстояний пройденного ультразвуком от датчика до контролируемой точки и обратно позволило сократить суммарное количества расчетов в  $n^2$ , где  $n$  – количество пьезоэлектрических преобразователей антенной решетки,
- реализация алгоритма реконструкции внутренней структуры ОК на жесткой логике позволило производить вычисления параллельно и в реальном времени,
- применение методики представления ОК в виде точек с симметрией относительно элементов антенной решетки позволяет хранить в памяти только те расстояния, пройденные ультразвуком, которые необходимы при расчете для заданной

разрешающей способности, что сокращает требуемый объем памяти для хранения расстояний не менее чем в 4 раза.

## Список литературы

1. Угольников А.В. Применение многоэлементных пьезопреобразователей при скоростной ультразвуковой дефектоскопии рельсов железнодорожного пути / А.В. Угольников // Инженерный вестник Дона. Издательство: Северо-Кавказский научный центр высшей школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону) . – 1982. – т.24. – № 1(24). – 100с.
2. ГОСТ Р 51901.1-2002 Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. [Текст]. – Москва: Изд-во стандартов, 2002. – 28 с.
3. Ткаченко А.А. Развитие методов, разработка оборудования и технологии ультразвукового контроля электросварных труб в процессе производств [Текст] / А.А. Ткаченко // Диссертация. – 2014. – 255с.
4. Сухоручкин Д.А. Ультразвуковая визуализация малых рассеивателей через неоднородный по толщине твердотельный слой [Текст] / [Д.А. Сухоручкин и др. ] // Изд.-во МГУ им. Ломоносова, Москва. – 2017. – № 5. – С. 2-4.
5. Бойчук А.С Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из пкм [Текст] / [А.С. Бойчук А.С. и др.] // Сборник трудов IX Общероссийская молодежная научно-техническая конференция "Молодежь. Техника. Космос". – Санкт-Петербург, 19-21 апреля 2017 г. – С. 41-46.
6. Сканирующие устройства для ультразвукового контроля / Цомук С.Р., Ястребов В.А. // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – Т.9.– № 4. – С. 77-80.
7. Дифракционные способы определения геометрических параметров и внутренних дефектов элементов образцов вооружения, военной и специальной техники выполненной по аддитивным технологиям / Лебедев Е.Л., Кофнов О.В., Михайленко А.В. Санкт-Петербургский Государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург. ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург. // Инновационные материалы и технологии: сборник докладов научно-практической конференции, 18 апреля 2017 г. – М.: Полигон, 2017. – 136 с.
8. Метрологическое обеспечение высокоточных измерений в Сибирском Федеральном округе / [Г.В. Шувалов и др.] // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современное состояние методов, средств и метрологического

обеспечения экспериментальных исследований, испытаний и эксплуатации изделий авиационной и ракетно-космической техники» октябрь 2015 год. – С. 22-24.

9. Обработка деталей РКТ с наличием сложных поверхностей / В. М. Хилько, А. А. Ильченко, Т. Г. Орешенко. – Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – Ч. 1. – 604 с.

10. ГОСТ Р 53464-2009 Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. [Текст]. – Москва: Изд-во стандартов, 2009. – 56 с.

11. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учебное пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальников. – Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2007. – 243 с.

12. ГОСТ 15467 - 79 Управление качеством продукции. — Введ. 1979-07-01 ВЗАМЕН ГОСТ 15467-70.— М.: Изд-во стандартов, 1979.— 22 с.

13. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник/ Ю.В. Ланге, В.А. Воронков – М.: Авторское издание, 2003. – 120 с.

14. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие / Н.П. Алешин, В.Г. Лупачев– М.: Выш.шк., 1997. – 271 с.

15. Дефекты металла: Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение и ТКМ» / В.П. Расщупкин, М.С. Корытов. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2006. – 37 с.

16. Дефекты литых заготовок и способы их обнаружения. / Е. Ю. Карпова, Н. И. Габельченко, В. Д. Илюхин ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 88 с.

17. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. – Введ. 1985-07-01 взамен ГОСТ 2601-74.— М.: Изд-во стандартов, 1985.— 57 с.

18. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль: Учеб.пособие.— Киев: Высшая школа, 1990. – 207 с.

19. Методы неразрушающего контроля. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Н. В. Кашубский, А. А. Сельский, А. Ю. Смолин и др. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 1 электрон. оптический диск (DVD).

20. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. – Введ. 1979-07-01 взамен ГОСТ 18353-73. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 12 с.

21. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, , и др.; Под ред. В.В. Клюева 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
22. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. Кн. 2: В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3: В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.
23. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / Под ред. В.Ф. Криворудченко. – М.: Маршрут, 2005. – 436 с.
24. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Введ. 1988-01-01 взамен ГОСТ 21105-75. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 16 с.
25. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие/ И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.— М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
26. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. Кн. 2: [К.В. Подмастерьев и др.]. Электрический контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.
27. ГОСТ 25315-82 Контроль неразрушающий электрический. – Введ. 1983-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 13 с.
28. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1: [А.И. Евлампиев и др.] Контроль герметичности. Кн. 2: [Ю.К. Федосенко и др.] Вихретоковый контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
29. Методические рекомендации о порядке проведения вихретокового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах (РД-13-03-2006). Серия 28. Выпуск 10 / Под общ.ред. К.Б. Пуликовского. – М.: открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008 – 44 с.
30. ГОСТ 23480-79 Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. – Введ. 1980-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.
31. ГОСТ 23483 – 79 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. – Введ. 1980-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 14 с.

32. Методы дефектоскопии сварных соединений: Учебное пособие для учащихся энергетических, энергостроительных и сварочных техникумов / [В.Г. Щербинский и др.]; под общ.ред. В.Г. Щербинского. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
33. ГОСТ 20426-82 Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные – Введ. 1983-07-01 взамен ГОСТ 20426-75. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 25 с.
34. Радиационный метод. Основы радиационного неразрушающего контроля. / Назипов Р.А., Храмов А.С., Зарипов Л.Д. – Казань: Издательство Казанск. гос. ун-та, 2008. – 66с.
35. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
36. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые – Введ. 2015-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1915. – 28 с.
37. РД РОСЭК-001-96 Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Введ. 1996-09-01. – М.: Российская экспертная компания, 1996. – 40 с.
38. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткреймер, Г. Крауткреймер; Пер. с нем. – М. Металлургия, 1991. – 752 с.
39. ГОСТ 24522 – 80 Контроль неразрушающий капиллярный. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 12 с.
40. ГОСТ 18442 – 80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. – Введ. 1981-07-01 взамен ГОСТ 18442-73. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 16 с.
41. ГОСТ 28369 – 89 Контроль неразрушающий. Облучатели ультрафиолетовые. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 9 с.
42. ГОСТ 24522 – 80 Контроль неразрушающий капиллярный. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 12 с.
43. ГОСТ Р 23479 Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. – Введ. 1980-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 10 с.
44. Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные, документы, стандарты по УЗК / Составитель В.А. Троицкий. – К.: Феникс, 2006. – 224 с.

45. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – М.: Тиссо. 2005 – 326с.
46. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение. 1986. – 260 с.
47. Шрейбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 416с.
48. Li M., Hayward G. Ultrasound nondestructive evaluation (NDE) imaging with transducer arrays and adaptive processing // Sensors. 2012.
49. Воскресенский Д.И. Антенны с обработкой сигнала: Учебное пособие для вузов. – М.: Сайнс-пресс, 2002. – 80 с.
50. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. / [В.С. Филиппов и др.]; под ред. Д.И. Воскресенского – 2-е изд., дополненное и проработанное – М.: Радио и связь, 1994. – 529 с.
51. Расчеты ультразвуковой дефектоскопии. Краткий справочник. / И.Н. Ермолов, А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян– ООО НПЦ НК «ЭХО+» Москва. – 2004 г. – 109 с.
52. Manjula K. и др. Ultrasonic time of flight diffraction technique for weld defects: A review // Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol. 2012.
53. Hopkins D. и др. Advanced Phased Array Technologies for Ultrasonic Inspection of Complex Composite Parts // NDT Canada. 2011.
54. Spies M. и др. Synthetic aperture focusing and time-of-flight diffraction ultrasonic imaging - Past and present // Journal of Nondestructive Evaluation. , 2012.
55. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2008.
56. Thomenius K.E. Miniaturization of Ultrasound Scanners // Ultrasound Clin. 2009.
57. Connolly G.D., Jobst M. Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds // Proc. ECNDT. 2010.
58. Bulavinov A. и др. Quantitative ultrasonic testing of pressurized components using sampling phased array // Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. , 2006.



59. Chiao R.Y., Thomas L.J. Analytic Evaluation of Sampled Aperture Ultrasonic Imaging Techniques for NDE // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1994.
60. Beine C. и др. NDT for CFRP Aeronautical Components A Comparative Study // NDT Aerosp. 2010.
61. Garcia G., Zhang J. Application of Ultrasonic Phased Arrays for Rail Flaw Inspection. , 2006.
62. Bernus L. von и др. Sampling phased array - A new technique for signal processing and ultrasonic imaging // Insight Non-Destructive Test. Cond. Monit. 2006.
63. Pudikov S, Bulavinov A. Innovative ultrasonic testing ( UT ) of nuclear components by sampling phased array with 3D visualization of ... // 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. , 2010.
64. Попов Б.А., Теслер Г.С. Вычисление функций на ЭВМ. Справочник. – Киев: «Наукова думка», 1984. – 599с.
65. Ледовский М.И. Обработка вещественных данных в микроконтроллерах с фиксированной точкой // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – № 2 (37). – С.52-58.
66. А.А. Горшков Методы реализации целочисленных вычислений в ПЛИС. / Логвин А.И. – Научный вестник МГТУ ГА № 139, 2008. – 20 с.
67. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня./ Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – 104 с.
68. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1: Ф.Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 560 с.
69. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 1: В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. Акустическая тензометрия. Кн. 2: Г.С. Шелихов. Магнитопорошковый метод контроля. Кн. 3: М.В. Филинов. Капиллярный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.
70. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.

71. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 8: В 2 кн. Кн. 1: [В.В. Клюев и др.] Экологическая диагностика. Кн. 2: А.В. Ковалев. Антитеррористическая и криминалистическая диагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 789 с.
72. Thomenius K.E. IEEE Symposium on Ultrasonics // IEEE Symposium on Ultrasonics. , 1990.
73. Zhang J., Drinkwater B., Wilcox P.D. Comparison of ultrasonic array imaging algorithms for nondestructive evaluation // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2013.